



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA UNIDAD XOCHIMILCO

División de Ciencias Biológicas y de la Salud

Licenciatura en Agronomía

ALUMNA:

Natali Hernández Casas 2212029913

Proyecto de servicio social relacionado a actividades de la profesión

Comparativa de diferentes sustratos para el establecimiento de plántulas de
Salicornia Europaea

ASESORES INTERNOS

Iván Pável Moreno Espíndola

Mariela Hada Fuentes Ponce

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	2
LUGAR DE REALIZACIÓN.....	5
JUSTIFICACIÓN.....	5
APORTE A LA SOCIEDAD	6
OBJETIVO GENERAL	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
METODOLOGÍA	6
ACTIVIDADES REALIZADAS.....	9
OBJETIVOS Y METAS ALCANZADAS.....	10
RESULTADOS	11
DISCUSION	19
CONCLUSION	23
RECOMENDACIONES.....	23
BIBLIOGRAFÍA.....	24

INTRODUCCIÓN

La *Salicornia spp.* es una planta halófila perenne perteneciente a la familia *Chenopodiaceae*, reconocida por su notable tolerancia a la salinidad y su capacidad para crecer en ambientes hostiles como suelos costeros y áreas con alta concentración de sal en suelo. Esta planta, que puede alcanzar hasta 40 cm de altura, presenta tallos carnosos y ramificados, hojas opuestas y espigas terminales de 3 a 6 cm, sus tallos son carnosos, articulados y de color verde brillante que pueden tornarse rojizos en otoño. Las hojas son pequeñas y escamosas, y suelen estar fusionadas con el tallo. La planta carece de flores vistosas, pero produce pequeñas inflorescencias en espigas durante el verano, características que la hace fácilmente identificable en los ecosistemas en los que prospera (Legarda y Artigas, 2011). Las semillas de *Salicornia* tienen una viabilidad de hasta dos años, aunque pierden aproximadamente el 50% de esta en el primer año, lo que afecta su capacidad de germinación a largo plazo (Parra *et al.*, 2018).

Dependiendo de su sensibilidad a la sal, las halófitas pueden clasificarse en obligadas o facultativas, siendo las obligadas las que requieren niveles moderados de salinidad para su crecimiento óptimo, mientras que las facultativas toleran un rango más amplio de salinidad (Castagnino, 2021). Esta planta realiza la fotosíntesis mediante la vía C4, lo que le permite absorber dióxido de carbono de manera eficiente, y presenta mecanismos de bioacumulación y fitoextracción que le permiten translocar sales desde las raíces hacia la parte aérea, haciéndola altamente eficiente en la adaptación a condiciones extremas (Coc-Coj et al., 2020).

La capacidad de la *Salicornia spp.* para tolerar y prosperar en suelos salinos la clasifica como una planta de interés tanto científico como económico. Tradicionalmente, la *Salicornia* se ha utilizado en la fabricación de jabón, vidrio y medicamentos, pero en años recientes ha ganado relevancia por su potencial en la industria alimentaria. Sus semillas son fuente de aceites de alta calidad, mientras que sus ramas son empleadas como ingrediente en la gastronomía gourmet. Además, el consumo de *Salicornia* ha sido asociado a beneficios para la salud, incluyendo la disminución de la presión arterial, lo que incrementa su valor como cultivo emergente en suelos marginales (Coc-Coj et al., 2020)

Existe una limitante dentro del género de las halófitas y es que ante el estrés salino la tasa de germinación disminuye, de acuerdo a Robledano (2022) la presencia de sal durante las etapas de germinación repercuten en su desarrollo y al ser sometidas bajo diferentes porcentajes de salinidad la halófitas presentan mayor germinación en bajos porcentajes de sal e incluso en nula presencia de sal, por lo cual, las halófitas no necesitan obligatoriamente sal para su desarrollo embrionario aunque tengan la capacidad de adaptación.

Estudios realizados por (Grigore et al., 2012) demuestran que las especies halófitas no necesitan sal para su crecimiento y desarrollo; de hecho, prosperan mejor en sustratos sin sal y ricos en nutrientes. Estos hallazgos sugieren que, además de la

salinidad del suelo, la disponibilidad de agua y nutrientes también representa factores limitantes significativos para el crecimiento de estas plantas en hábitats salinos naturales. Es probable que las halófitas sean especies "refugiadas", desplazadas de zonas sin salinidad por especies glicófitas, manteniendo una alta competitividad en condiciones subóptimas y estresantes para las especies no tolerantes. Esto explicaría su presencia exclusiva en suelos salinos en la naturaleza.

El género de la *salicornia* es un tipo de halófito facultativo, es decir, que es capaz de vivir en condiciones salinas o no salinas, sin embargo, como ya se ha mencionado con anterioridad, la *salicornia* ha presentado crecimiento óptimo en suelos no salinos, por lo cual se podría establecer en un sustrato distinto al salino, debido a que acumula compuestos bioactivos similares a los cultivados de forma nativa, proporcionando una fuente importante de minerales y polifenoles.

La diversificación de cultivos es clave para introducir especies no convencionales en el mercado agrícola, lo que genera un creciente interés científico y agronómico. Este interés se debe a su capacidad para tolerar condiciones adversas, como la salinidad, y su potencial adaptación a ambientes limitantes para la producción. Un ejemplo de esto es la región de "Las Tablas" en la alcaldía de Tláhuac, Ciudad de México, donde los suelos presentan altos niveles de salinidad que restringen las actividades agrícolas y reducen la variedad de productos disponibles.

En este contexto, la *salicornia* puede ser un cultivo alternativo viable, para aprovechar suelos con alto contenido salino. Para ello, es necesario conocer los sustratos que mejoren su germinación y crecimiento, así como las técnicas adecuadas para sembrarla en medios de cultivo, trasplantarla a sustratos y, finalmente, establecerla en suelo. Estos pasos son esenciales para asegurar el desarrollo y éxito de la *salicornia* en áreas afectadas por la salinidad, permitiendo una opción más sostenible y diversificada para la producción agrícola en la región.

LUGAR DE REALIZACIÓN

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, Laboratorio de Suelos y Aguas y, Laboratorio de Fisiología de los Cultivos (DPAA).

JUSTIFICACIÓN

La diversificación de cultivos y el uso sustentable de los suelos es esencial para el desarrollo de una agricultura moderna que optimice los recursos naturales. En este contexto, *Salicornia europaea*, una halófito obligada con características metabólicas únicas que le permiten prosperar en suelos salinos donde otros cultivos convencionales no pueden crecer, se presenta como una alternativa para el aprovechamiento de suelos salinos y la diversificación de cultivos.

Sin embargo, para lograr el establecimiento exitoso de la *salicornia* en ambientes salinos, es crucial optimizar su germinación y desarrollo. Las semillas de muchas especies halófitas, incluida la *salicornia*, presentan problemas de dormancia debido a la dureza de sus cubiertas, lo que limita su viabilidad y vigor en condiciones de cultivo sin tratamientos previos. En este sentido, el presente proyecto es crucial porque evaluará el desarrollo fenológico bajo diferentes sustratos en plántulas que recibieron un tratamiento de escarificación en estado de semilla que se realizó en una investigación adjunta.

Esta etapa intermedia, donde las plántulas crecen en sustrato controlado bajo métodos de riego antes de ser trasplantadas a suelos salinos, es fundamental para garantizar su supervivencia y éxito en condiciones reales de campo. Comprender los sustratos que optimicen su desarrollo permitirá maximizar el potencial de esta especie en sistemas agrícolas de suelos salinos.

El objetivo principal de este proyecto será evaluar el crecimiento de plántulas de *Salicornia europaea* bajo diferentes sustratos, considerando factores como el contenido orgánico y la textura del suelo. Al hacer uso de plántulas germinadas bajo tratamiento de escarificación realizadas en otra investigación ligada a la presente se

espera identificar el sustrato que promueva el vigor y supervivencia para su posterior establecimiento en campo, contribuyendo al aprovechamiento de tierras marginales y suelos salinos. Con ello, se busca ofrecer alternativas de cultivo en áreas donde la agricultura convencional es inviable.

APORTE A LA SOCIEDAD

En el ámbito social, este proyecto radica en la posibilidad de introducir una nueva especie poco conocida, la *salicornia europea* que tiene la capacidad de adaptación a condiciones salinas la convierte en una alternativa para el aprovechamiento de terrenos que por su edafología los convierte en una limitante para productores en regiones donde la salinidad limita la agricultura, como en la alcaldía de Tláhuac.

Esto abre la posibilidad para terrenos que antes eran difíciles de aprovechar puedan ser utilizados de manera eficiente, ofreciendo con ello una solución innovadora y práctica para los agricultores locales al ofrecer la recuperación y aprovechamiento de suelos salinos.

OBJETIVO GENERAL

- Evaluación de la supervivencia y vigor de *Salicornia europea* en diferentes sustratos

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reproducción in vitro de tejidos vegetales

METODOLOGÍA

El presente proyecto se llevará a cabo en tres fases para evaluar el desarrollo de *Salicornia Europaea* bajo distintos tipos de sustrato. En la primera fase, se utilizarán plántulas que hayan germinado exitosamente posterior a tratamientos de escarificación donde se utilizaron métodos químicos y físicos que luego fueron germinadas en medio MS y que serán trasplantadas a tres tipos de sustrato, el primero denominado Sunshine que de acuerdo a la etiqueta del producto está

integrado por una combinación uniforme de musgo, *Sphagnum Canadiense*, vermiculita cuidadosamente seleccionada, a la que se le adicionan carbonatos, para ajustar el pH, un agente humectante patentado y además una formulación base de fertilizantes, esto en cámaras de germinación, donde se espera un crecimiento aproximado de 5 cm, suficiente para brindar soporte a las plántulas, el segundo será una combinación de 70% turba y 30% perlita y el tercero, un sustrato convencional a base de tierra negra.

Durante esta fase, las plántulas serán regadas con agua potable sin sal con el objetivo de comparar el desempeño en distintos sustratos donde se evaluará aspectos como altura de la planta, biomasa producida y su duración de vida. No se utilizará sal para el riego o germinación debido a que la bibliografía consultada indica que la presencia de sal en las primeras etapas repercute en su desarrollo.

En la fase dos, se espera obtener al menos un 50% de crecimiento óptimo en la población trasplantada a sustrato, de las cuales, será seleccionada la planta que será la planta madre con características adecuadas como, edad ontogenética y estado fisiológico de la misma, la cual será sometida a un proceso de reproducción in vitro por tejidos vegetales donde se le inducirá las condiciones necesarias para la obtención de respuestas fisiológicas o morfológicas a partir de explantes vegetal. este proceso a su vez está dividido en las siguientes fases:

- Selección y Preparación de la planta madre
- Desinfección de las yemas de la planta y/o desinfección de semillas
- introducción del material seleccionado in vitro
- Multiplicación de brotes
- Enraizamiento
- Aclimatación

El medio de cultivo para este procedimiento será Agar-MRS con reguladores de crecimiento como giberelinas para promover la división celular, la elongación celular y la formación de callos, este medio nutritivo permitirá el desarrollo de los explantes y enraizamiento. Se realizarán también ensayos de aclimatación. Finalmente, en la

tercera fase, las plántulas que hayan alcanzado la altura adecuada serán trasplantadas a suelo salino en la zona de Las Tablas, en la alcaldía Tláhuac. Esta última etapa permitirá evaluar la adaptación y desarrollo de las plantas en condiciones de campo real, donde la salinidad es alta, simulando el entorno en el que se espera que la *Salicornia Europaea* prospere.

Este proyecto integral permitirá comprender cómo el crecimiento y adaptación de plántulas de *Salicornia Europaea*, desde la germinación en condiciones controladas hasta su establecimiento en suelo, proporciona información clave para su cultivo en regiones afectadas por la salinidad del suelo, a continuación, se muestra una tabla con la metodología dividida por fases (Tabla 1).

Tabla 1. Metodología dividida por fases donde se observa el tiempo aproximado de cada fase.

FASE 1. TRANSPLANTE A SUSTRATO			
N° CÁMARAS			
POR TRATAMIENTO	SUSTRATO	TIEMPO ESTIMADO	N° ESTIMADO DE PLÁNTULAS
1	Sunshine	60- 90 días	45
1	Turba y perlita	60-90 días	
1	Tierra negra	60-90 días	
FASE 2. REPRODUCCIÓN IN VITRO POR TEJIDOS VEGETALES			
PLANTA MADRE	MEDIO DE CULTIVO	TIEMPO ESTIMADO DE ESTABLECIMIENTO Y CRECIMIENTO	TIEMPO DE ACLIMATACIÓN
Salicornia	Agar-MS	60 días	20 a 30 días
Europaea			
FASE 3. INTRODUCCIÓN A SUELO			
Las plántulas obtenidas en ambas metodologías, es decir, las que fueron trasplantadas a sustrato y las obtenidas en la reproducción in vitro serán llevadas a suelo una vez que hayan sido aclimatadas y establecidas en sustrato de manera exitosa			

ACTIVIDADES REALIZADAS

Al inicio del proyecto se planteó una metodología estructurada en tres fases consecutivas, primero, evaluar la supervivencia de *Salicornia Europaea* en diferentes sustratos para seleccionar una planta madre vigorosa, después, emplear ese material vegetal para la reproducción in vitro mediante desinfección, introducción y multiplicación de tejidos; y finalmente, llevar las plantas regeneradas a un proceso de establecimiento en suelo. Sin embargo, conforme avanzó la experimentación, fue evidente que las condiciones reales de comportamiento de *Salicornia europaea* no permitían avanzar de manera lineal con el esquema originalmente propuesto.

En la primera fase, las plántulas obtenidas in vitro fueron trasladadas a los sustratos seleccionados, esperando que al menos parte de la población lograra estabilizarse para proceder con la elección de la planta madre. No obstante, desde los primeros días se observó un deterioro fisiológico acelerado: clorosis, pérdida de turgencia, detención del crecimiento y, finalmente, mortalidad total antes de las dos semanas.

Este resultado no solo limitó la continuidad de la fase inicial, sino que eliminó por completo la posibilidad de contar con plantas madre aptas para iniciar la reproducción in vitro planificada. A partir de este punto fue necesario replantear la estrategia metodológica. Para evitar detener el proyecto, se decidió generar nuevamente material vegetal.

Se realizó entonces una resiembra con un protocolo más estricto de desinfección del sustrato y de las semillas, seguido de una nueva siembra in vitro destinada a obtener plántulas frescas para continuar con las evaluaciones. Estas plántulas fueron manejadas bajo las mismas condiciones de aclimatación inicial, utilizando el sustrato que había mostrado la mejor respuesta relativa (Sunshine). Sin embargo, el patrón de deterioro y muerte se repitió, lo que confirmó que el problema no provenía del manejo del sustrato, sino de una condición fisiológica no satisfecha por el sistema experimental. Ante la persistencia de la mortalidad, se incorporó una fase adicional con reguladores de

crecimiento, utilizando ácido indolacético como estimulante de la elongación y la formación de tejidos nuevos.

El objetivo era determinar si el problema residía en la incapacidad de las plántulas para activar rutas hormonales claves al momento del trasplante. A pesar de ello, los reguladores no generaron crecimiento nuevo ni recuperación del tejido, lo que indicó que las rutas hormonales tampoco estaban respondiendo bajo las condiciones establecidas. Finalmente, con el fin de aproximarse a las condiciones iónicas naturales de la especie, se realizó un ensayo complementario utilizando una mezcla de suelo salino y medio MS proveniente de un entorno naturalmente salino. Este tratamiento logró una germinación del 100%, pero las plántulas permanecieron de tamaño muy reducido (0.5 cm en promedio), sin desarrollo radicular funcional y con clorosis evidente, por lo que no pudieron ser sometidas a aclimatación ex vitro.

Debido a estos resultados, la metodología planteada originalmente ya no podía ejecutarse de manera completa. Aun así, cada ajuste realizado permitió obtener información crítica sobre los límites fisiológicos de *Salicornia europaea* bajo condiciones controladas sin acceso a sales. Por ello, la metodología final del estudio se centró en la evaluación comparativa de supervivencia, vigor y respuestas fisiológicas frente a diferentes sustratos y condiciones experimentales, integrando los ensayos adicionales que surgieron como consecuencia directa del comportamiento observado en la especie.

OBJETIVOS Y METAS ALCANZADAS

Objetivo general

- Evaluar la supervivencia y el vigor de plántulas de *Salicornia europaea* en diferentes sustratos bajo condiciones controladas.

Grado de cumplimiento

El objetivo general se cumplió de manera parcial. Si bien no se logró el establecimiento exitoso ex vitro de las plántulas, se obtuvo información experimental valiosa sobre su

supervivencia, comportamiento fisiológico y límites de adaptación bajo condiciones no salinas y de altitud elevada.

Objetivos específicos

- Reproducción in vitro de tejidos vegetales

Grado de cumplimiento

La obtención de plantas madre viables para la reproducción in vitro no fue posible debido a la mortalidad temprana y recurrente de las plántulas durante la etapa de aclimatación ex vitro. A pesar de la evaluación comparativa de distintos sustratos y del uso de condiciones controladas, las plántulas no lograron alcanzar un estado fisiológico estable ni desarrollar tejidos meristemáticos funcionales. Esta respuesta impidió la selección de material vegetal con el vigor y la estabilidad requeridos para iniciar procesos de multiplicación in vitro, lo que evidencia que la producción de plantas madre en *Salicornia europaea* depende de condiciones iónicas y ambientales no satisfechas en el sistema experimental. De manera consecuente, no fue posible la introducción de plántulas a suelo salino en condiciones de campo, ya que no se dispuso de material vegetal funcional con desarrollo radicular y capacidad fisiológica suficiente para tolerar el trasplante. La mortalidad previa al establecimiento confirma que el objetivo de evaluar la supervivencia y el vigor fue alcanzado, al demostrarse experimentalmente que, bajo las condiciones evaluadas, *Salicornia europaea* no logra un establecimiento ex vitro exitoso.

RESULTADOS

El proceso experimental de aclimatación ex vitro y establecimiento de *Salicornia Europaea* presentó variaciones fisiológicas y morfológicas significativas a lo largo de las diferentes etapas de experimentación. En términos generales, los resultados obtenidos reflejaron una baja tolerancia de las plántulas generadas in vitro al proceso de trasplante y

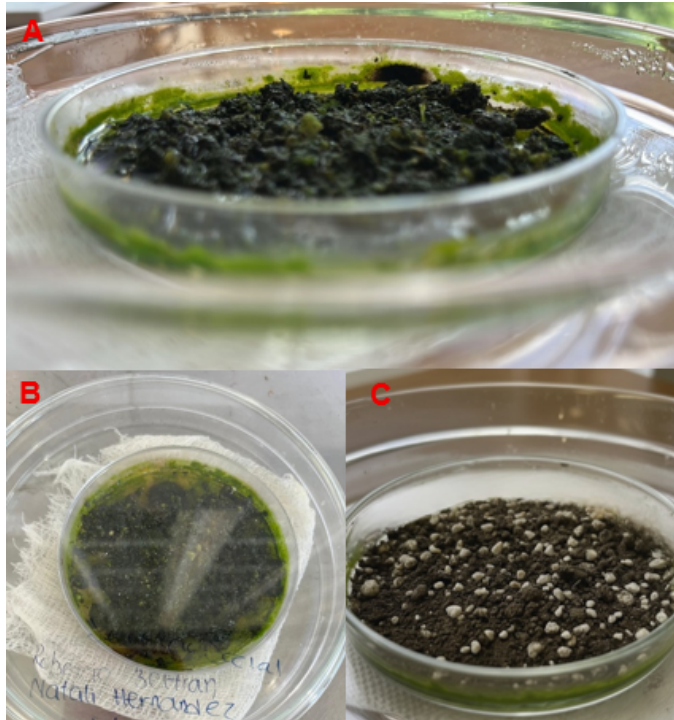
adaptación a condiciones exógenas controladas, independientemente del tipo de sustrato empleado o del uso de reguladores de crecimiento.

Primera fase: Aclimatación ex vitro inicial

En la primera fase se trabajó con 15 plántulas de *Salicornia Europaea* previamente germinadas en medio Murashige y Skoog (MS) tras la aplicación de un proceso de escarificación física y química realizadas en una investigación adjunta. Estas plántulas fueron subdivididas en tres grupos de tratamiento (T1, T2 y T3) según el tipo de sustrato utilizado para su aclimatación ex vitro: Sunshine, una mezcla de 70% turba con 30% perlita, y un sustrato convencional a base de tierra negra, respectivamente.

El proceso de aclimatación se llevó a cabo de manera progresiva, agregando paulatinamente el sustrato para favorecer la transición entre el medio in vitro y las condiciones ambientales externas (Figura 1). Sin embargo, durante las dos primeras semanas se observaron signos visibles de estrés fisiológico en todas las plántulas. Los síntomas se manifestaron inicialmente con clorosis en las primeras hojas y detención del crecimiento radicular, seguida de marchitez apical y necrosis generalizada del tejido vegetal.

Figura 1. Sustratos utilizados para la aclimatación ex vitro de *Salicornia Europaea*



Nota: A) Sustrato Sunshine, B) Tierra negra, C) Mezcla de sustrato, 70% turba y 30% perlita.

A los diez días posteriores al trasplante, se registró una mortalidad del 5% de la población correspondiente al Tratamiento 3, cuyo sustrato consistía en tierra negra. Este grupo fue el primero en manifestar signos evidentes de estrés y colapso, caracterizados por pérdida de turgencia, marchitez progresiva y necrosis.

Transcurridos cinco días posteriores, el resto de las plántulas en los dos tratamientos restantes comenzaron a evidenciar síntomas de deterioro estructural, reflejados en clorosis y detención total del crecimiento. Entre los tratamientos evaluados, el Tratamiento 1 (sustrato Sunshine) mostró una respuesta más estable durante los primeros días, presentando menores signos de marchitez y una coloración amarillenta gradual, aunque finalmente las plántulas murieron 24 horas después de manifestarse dicho cambio físico, completándose así la mortalidad total del ensayo.

Se registraron diferencias notables en la respuesta fisiológica de las plántulas frente a los distintos sustratos evaluados. En la Tabla 3 se resumen los porcentajes de

mortalidad, supervivencia y las principales manifestaciones morfológicas identificadas en cada tratamiento a lo largo del ensayo.

Tabla 3. Porcentaje de mortalidad, supervivencia y síntomas morfológicos observados en plántulas de *Salicornia Europaea* bajo distintos tratamientos de sustrato, 15 días después del trasplante.

TRATAMIENTO	TIPO DE SUSTRATO	DÍA DE EVALUACIÓN	MORTALIDAD (%)	SÍNTOMAS MORFOLÓGICOS OBSERVADOS	OBSERVACIONES
T1	Sunshine	Día 10	0%	Sin síntomas severos	Plántulas con apariencia estable; respuesta más favorable en la fase inicial
T1	Sunshine	Día 15	100%	Coloración amarillenta progresiva y colapso estructural	Muerte total 24 h después del cambio de coloración
T2	70% turba + 30% perlita	Día 10	0%	Sin síntomas severos visibles	Estado fisiológico transitorio; crecimiento detenido a los 15 días
T2	70% turba + 30% perlita	Día 15	100%	Clorosis generalizada y detención del crecimiento	Mortalidad total al final del periodo
T3	Tierra negra	Día 10	5%	Pérdida de turgencia, marchitez progresiva y necrosis inicial	Primer tratamiento en mostrar colapso morfológico
T3	Tierra negra	Día 15	100%	Clorosis foliar y ausencia de crecimiento radicular	Mortalidad total del grupo experimental

En general, los resultados reflejaron que todas las plántulas presentaban una reducción progresiva en la viabilidad fisiológica después del trasplante, independientemente del tipo de sustrato. Sin embargo, el tratamiento con Sunshine (T1) mostró una mayor resistencia inicial al estrés, evidenciando una respuesta más gradual ante las condiciones postrasplante antes de la muerte total de las plántulas.

Segunda fase: Resiembra con desinfección y selección de sustrato

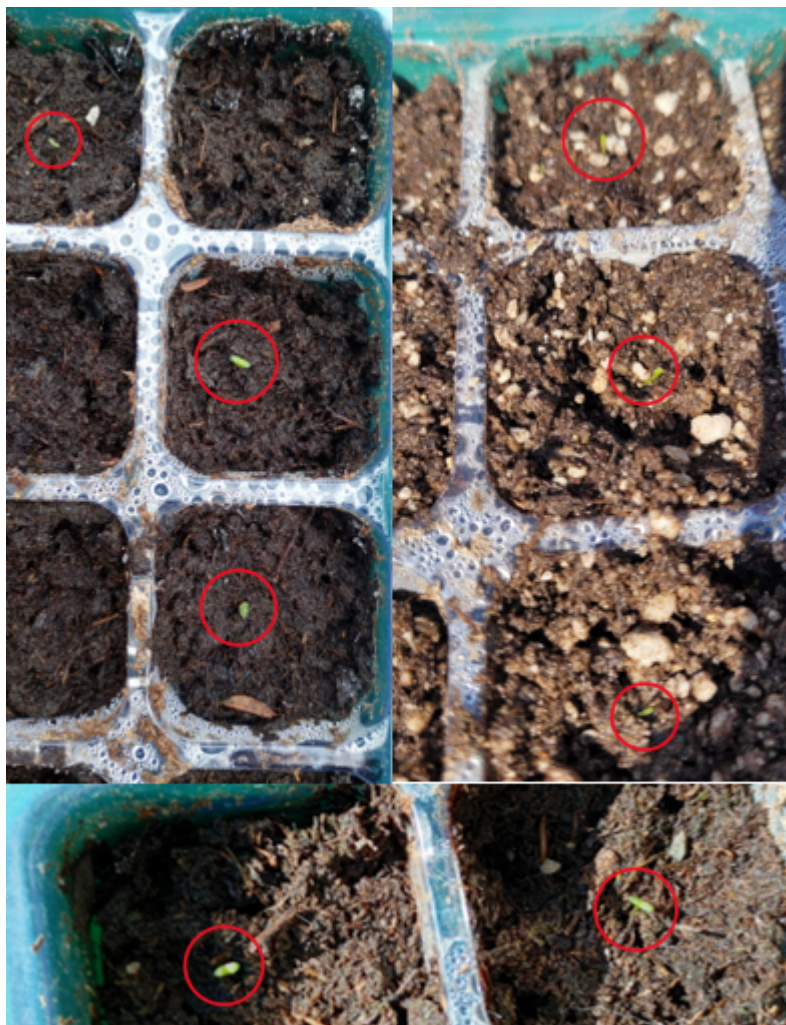
Ante la mortalidad total registrada, se llevó a cabo una segunda siembra de 100 semillas, aplicando un protocolo más estricto de lavado y desinfección con el fin de eliminar posibles patógenos fúngicos o bacterianos que pudieran estar interfiriendo en la viabilidad y desarrollo radicular. El tratamiento incluyó el uso de jabón neutro, agua destilada, hipoclorito de sodio al 12% y etanol al 70%.

Para esta fase se seleccionó exclusivamente el sustrato Sunshine, dado que durante la primera experimentación presentó una mejor respuesta inicial antes de la descomposición fisiológica. Del total de semillas sembradas, 8 lograron germinar exitosamente representando una tasa de germinación del 8%. Las plántulas emergieron con estructuras cotiledóneas visibles y desarrollo inicial del hipocótilo (Figura 2 y 3); sin embargo, tras ser sometidas al proceso de aclimatación ex vitro, comenzaron a presentar amarillamiento foliar progresivo y finalmente necrosis total del tejido. A los 15 días, la supervivencia fue nula.

Figura 2. Plántulas de *S. Europaea* germinadas en medio Murashige y Skoog (MS).



Figura 3. Plántulas trasplantadas a sustrato Sunshine

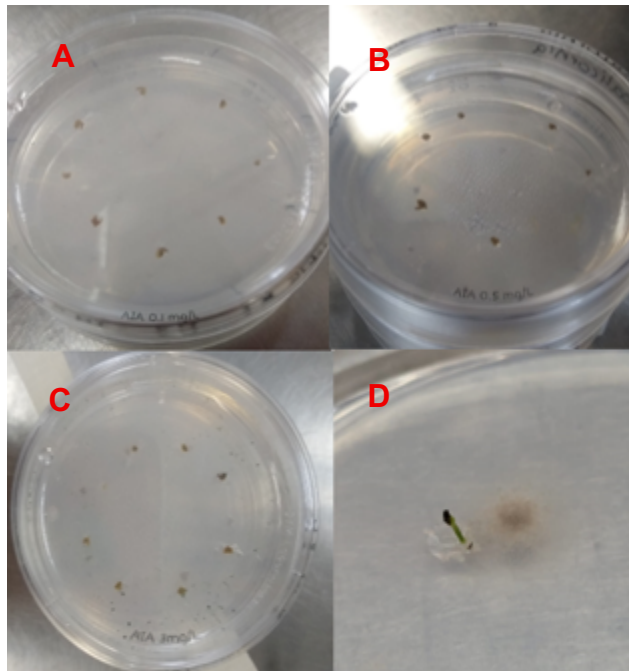


Tercera fase: Resiembra con reguladores de crecimiento

En una tercera etapa se realizó una resiembra de 20 semillas con la aplicación de ácido indolacético (AIA) como regulador de crecimiento, evaluando tres concentraciones (0.1 g, 0.5 g y 3 g). Las semillas se incubaron durante un periodo de 30 días bajo condiciones controladas de temperatura y humedad (Figura 3).

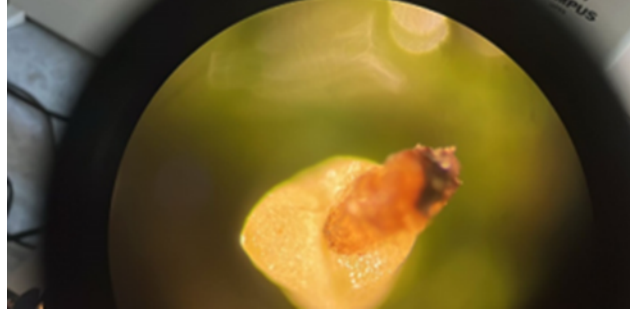
Durante el periodo de incubación no se observaron eventos de germinación en los tratamientos T1 y T2, mientras que en T3 (3 g de AIA) se obtuvo una única plántula germinada (1%). Esta plántula fue sometida al mismo proceso de aclimatación ex vitro, presentando síntomas idénticos a los registrados en fases previas: amarillamiento, detención del crecimiento y muerte a los 15 días (Figura 4).

Figura 3. Semillas de *Salicornia Europaea* sembradas en medio MS con Acido Indolacético



Nota: A) 0.1 g, B) 0.5 g, C) 3g

Figura 4. Única plántula obtenida del T3: 3g AIA

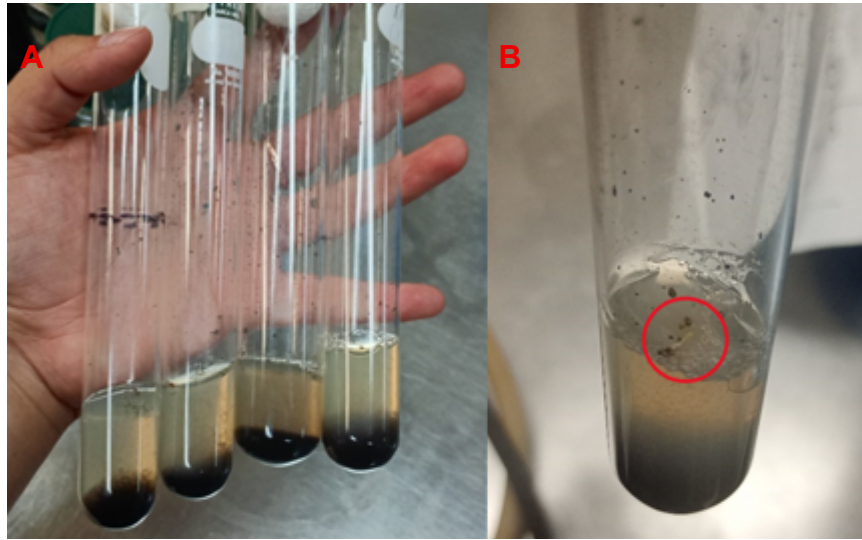


Ensayo complementario: mezcla de suelo salino y medio MS

Con el objetivo de aproximar las condiciones naturales de crecimiento de *S. europaea*, se implementó una experimentación adicional a la metodología propuesta, utilizando una mezcla de suelo salino y medio MS, proveniente de una región con alto contenido de sal en sus componentes (Figura 5), que es el ideal para su óptimo crecimiento de acuerdo con la bibliografía consultada durante la experimentación. Se sembraron seis semillas en tubos de ensayo, bajo condiciones de humedad y temperatura controladas.

En este tratamiento se observó germinación del 100%, lo que sugiere que la composición iónica del suelo local particularmente por su alto contenido de sales favoreció el inicio del proceso germinativo. Sin embargo, el desarrollo posterior fue limitado a 0.5 cm de altura promedio, con clorosis evidente en los tejidos y ausencia de elongación radicular, indicando un crecimiento inicial inducido, pero no sostenido, estas plántulas no se sometieron a aclimatación exvitro ya que el tamaño era mínimo y, por ende, sin soporte radicular

Figura 5. Mezcla de suelo salino y medio MS



Nota: A) Tubos con medio ms y suelo salino, B) Plántula germinada

DISCUSION

Los resultados obtenidos confirman que las plántulas de *Salicornia europaea* producidas in vitro presentan una supervivencia extremadamente baja tras el trasplante ex vitro, independientemente del sustrato empleado. Esta respuesta coincide con lo reportado por diversos autores respecto a la sensibilidad de la especie durante sus primeras etapas de crecimiento fuera de ambientes salinos o costeros, que corresponden a su hábitat natural.

Uno de los patrones más evidentes en los resultados fue el deterioro temprano de las plántulas, aun cuando los sustratos utilizados presentaban condiciones físicas adecuadas. El factor común fue la ausencia total de sales en sustrato, lo cual se identifica como un elemento determinante. Estudios previos señalan que *S. europaea* no solo tolera altos niveles de salinidad, sino que depende de ellos para activar procesos fisiológicos esenciales. Cardenas-Perez et al. (2018) reportan un crecimiento óptimo entre 200 y 400 mM de NaCl, rango en el cual se induce la osmorregulación, la

acumulación de iones en la vacuola y la estabilidad de enzimas asociadas al estrés salino.

El cultivo sin sal provoca estrés hipoosmótico, caracterizado por pérdida de turgencia, fallas en la regulación iónica y necrosis (Hyskova & Ryslava, 2018). Este comportamiento coincide con las observaciones del experimento: clorosis temprana, marchitez y colapso estructural. De manera similar, Calone et al. (2020) describen deterioro rápido e irreversible en plántulas germinadas sin sal y expuestas posteriormente a condiciones ambientales. Incluso evidencia molecular, como la descrita por Fussy et al., donde se indica que muchos genes vinculados al mantenimiento iónico solo se expresan en presencia de NaCl, lo cual sugiere que las plántulas del experimento operaban fisiológicamente por debajo de su capacidad desde el inicio.

Si bien el tipo de sustrato generó diferencias en la velocidad del deterioro, los resultados muestran que, aun con mezclas físicamente adecuadas, la ausencia de sal continuó siendo el factor determinante. El sustrato Sunshine (T1) mostró inicialmente una resistencia ligeramente mayor, lo cual coincide con Gunning (2016) quienes señalan que sustratos aireados y con buen drenaje favorecen el establecimiento temprano. No obstante, ningún sustrato previno la mortalidad total, esta tendencia coincide con Turcios et al. (2023). y Puccinelli et al. (2024) quienes demostraron que en sistemas hidropónicos y en sustratos sólidos el éxito depende principalmente de la disponibilidad constante de sales. Los resultados del presente estudio refuerzan este resultado: la composición física del sustrato no compensa la ausencia del componente químico indispensable para la fisiológica de la especie.

Las plántulas desarrolladas en medio MS sin sal presentan paredes celulares más delgadas, tejidos altamente hidratados y estructuras poco preparadas para enfrentar estrés mecánico u osmótico, condiciones propias del crecimiento ex vitro. Pérez et al. (2024). reportan que la exposición progresiva a salinidad induce adaptaciones como el engrosamiento de la pared celular, la acumulación de pectinas y una ligera lignificación, todas esenciales para resistir tensiones osmóticamente desafiantes. Debido a que en

el presente estudio las plántulas nunca estuvieron expuestas a NaCl antes de la aclimatación, carecían de estas adaptaciones estructurales. Esto explica la pérdida rápida de integridad en menos de dos semanas, incluso en las plántulas que germinaron exitosamente en la segunda fase.

Diversos estudios demuestran que, en plantas halófilas, incluidas especies de *Salicornia*, la acción de las hormonas vegetales está fuertemente condicionada por la presencia de sales, por ejemplo, Liu et al. (2015) reportan que rutas hormonales como las reguladas por auxinas y citoquininas solo funcionan adecuadamente cuando la planta mantiene su equilibrio iónico, ya que la salinidad controla la apertura de canales de Na, la turgencia celular y la estabilidad de las paredes celulares. En ausencia de sal, las células entran en colapso osmótico y pierden la capacidad de responder a señales hormonales externas. Esto explica que, aun con hormonas de crecimiento aplicados en concentraciones adecuadas, las plántulas no desarrollaran tejido nuevo ni elongación radicular, hecho que se demostró en la fase tres de la experimentación.

Otro factor potencialmente influyente fue la altitud de la Ciudad de México (aproximadamente 2240 msnm) dado que la altura a nivel del mar es un factor clave para la fisiología de halófitas como *S. europaea*. En ambientes costeros, esta especie crece típicamente desde 0 hasta 200 msnm, donde la presión atmosférica, la densidad del aire y la disponibilidad de oxígeno difieren significativamente de la Ciudad de México. A mayor altitud, la reducción en la presión parcial de oxígeno puede limitar procesos metabólicos esenciales como la respiración, la eficiencia enzimático-proteica y el transporte activo de iones, fundamentales para la regulación osmótica en especies halófitas. Esto podría explicar por qué las plántulas germinan, pero no sostienen un crecimiento saludable.

Aunque existen registros aislados de *Salicornia* en regiones interiores, la mayoría de las poblaciones naturales se encuentran a nivel del mar, donde la humedad, la presión atmosférica y la radiación UV difieren significativamente. Chen et al. (2022), demostraron que la radiación UV aumenta con la altitud, incrementando la generación de especies reactivas de oxígeno, también denominadas ROS, que son moléculas que

juegan un papel crucial en varios procesos biológicos, incluyendo el crecimiento, desarrollo, señalización y defensa. En hábitats costeros, *S. europaea* activa mecanismos antioxidantes inducidos por la salinidad, no por radiación UV elevada. Al no contar con sal en las metodologías aplicadas, las plántulas quedaron expuestas a estrés fotooxidativo sin mecanismos de defensa activados, Ovando-Hidalgo et al. (2020) reportó dificultades similares en especies costeras trasladadas a altitudes elevadas sin preaclimatación, lo que concuerda con los resultados de este estudio.

La variabilidad poblacional también puede explicar la respuesta observada. Orzoł et al. (2025) menciona que distintas poblaciones de *S. europaea* presentan respuestas diferenciadas a la salinidad y que muchas requieren periodos de preaclimatación, especialmente las provenientes de zonas estrictamente marinas. Si las semillas utilizadas tienen origen costero, es probable que su tolerancia a ambientes interiores sea limitada, lo que explicaría la mortalidad uniforme aun con mejoras en la desinfección y el manejo en la segunda fase. Sumado a ello, la transición *ex vitro* se vuelve aún más crítica cuando las plántulas no reciben estímulos salinos desde las primeras etapas.

El hecho de que las pocas plántulas germinadas murieran durante la aclimatación refuerza el resultado de que la ausencia de NaCl, combinada con las condiciones atmosféricas de la Ciudad de México, constituye una barrera fisiológica que impide el establecimiento exitoso de la especie ya que el estrés de baja intensidad suele estimular respuestas metabólicas de aclimatación. Cuando el estrés es intenso y se rebasa el umbral de aclimatación, se activan los mecanismos de defensa que se encargan de combatir el estrés oxidativo, por ende, el resultado del desafío ambiental depende enteramente del equilibrio entre la producción y los mecanismos de eliminación del ROS, así como la intensidad y la duración del estrés.

Finalmente, el comportamiento iónico del suelo utilizado en el ensayo complementario sugiere que la germinación puede haber sido estimulada por la presencia de sodio y cloruros, pero el balance nutrimental puede no haber sido el adecuado para sostener un desarrollo posterior. La clorosis observada indica posible bloqueo en la absorción de nutrientes esenciales como nitrógeno, hierro o magnesio, ya sea por exceso de sales o

por incompatibilidad química al mezclar suelo salino con medio MS, que posee una formulación diseñada para condiciones no salinas.

CONCLUSION

Los resultados de este estudio demuestran que *Salicornia europaea* presenta una dependencia estricta a las condiciones ambientales propias de su hábitat natural para lograr un establecimiento ex vitro exitoso. Aunque se logró un trasplante adecuado a sustratos, el desarrollo posterior fue nulo o muy limitado, evidenciando que la salinidad es necesaria, pero se vuelve insuficiente cuando no se considera otros factores como humedad elevada, radiación moderada y presión atmosférica; factores determinantes para su desarrollo morfológico.

La mortalidad total en las metodologías aplicadas incluso bajo protocolos de desinfección mejorados, adición de reguladores de crecimiento y sustratos de mejor desempeño, refleja que las condiciones de la Ciudad de México constituyen un escenario incompatible con los requerimientos fisiológicos de una halófila estricta. El comportamiento observado sugiere que la especie no solo requiere salinidad para activar sus rutas metabólicas básicas, sino un ambiente integral coherente con su hábitat natural. Por lo tanto, el éxito futuro en su aclimatación ex vitro deberá considerar la reproducción holística de las condiciones costeras, así como estrategias de preaclimatación salina y atmosférica que permitan una transición gradual entre el ambiente in vitro y condiciones ambientales que difieren de su entorno natural.

RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos, se considera fundamental que futuras investigaciones incorporen la presencia de salinidad controlada desde las etapas iniciales de germinación y cultivo in vitro, con el fin de activar los mecanismos fisiológicos característicos de *Salicornia europaea*, particularmente aquellos relacionados con la regulación iónica y el equilibrio osmótico. Asimismo, resulta necesario implementar protocolos de preaclimatación salina progresiva previos al

trasplante ex vitro, que permitan inducir adaptaciones estructurales y funcionales capaces de incrementar la tolerancia de las plántulas a cambios bruscos en el ambiente.

Se recomienda también que los ensayos se desarrollen bajo condiciones ambientales que simulen de manera más fiel el hábitat natural de la especie, considerando factores como mayor humedad relativa y niveles moderados de radiación ultravioleta. De igual forma, la selección del origen poblacional de las semillas representa un aspecto clave, ya que poblaciones adaptadas a ambientes interiores podrían mostrar respuestas diferenciales frente a las condiciones experimentales. Adicionalmente, se considera pertinente que futuras investigaciones incluyan una evaluación más exhaustiva a nivel metabólico y fisiológico, que permita explicar los procesos internos responsables de la baja supervivencia observada.

Análisis de parámetros como actividad antioxidante, balance iónico, expresión de enzimas asociadas al estrés osmótico y eficiencia fotosintética aportarían información clave para comprender los mecanismos de colapso fisiológico en ausencia de salinidad. Este enfoque permitirá que los ajustes metodológicos futuros se basen en evidencia fisiológica concreta, y no únicamente en modificaciones estructurales del sustrato o del manejo agronómico.

BIBLIOGRAFÍA

- Castagnino, A.M. - Marina, J. 2021. Espárrago de mar (*Salicornia spp.*), una alternativa productiva valiosa como alimento y con potencial agroindustrial. Horticultura Argentina 41 (104): 95-125.
- Coc-Coj, O., Cámara-Mota, A., González-Cortés, N., & Jiménez-Vera, R.(2020). La salicornia: una planta halófila con propiedades funcionales. Revista Iberoamericana de Ciencias. www.reibci.org
- Grigore, M. N., Villanueva, M., Boscaiu, M., & Vicente, O. (2012). Do halophytes really require salts for their growth and development? An experimental

approach. *Notulae Scientiae Biologicae*, 4(2), 23–29.
<https://doi.org/10.15835/nsb427606>

- Cárdenas-Pérez, S., Rajabi Dehnavi, A., Leszczyński, K., Lubińska-Mielińska, S., Ludwiczak, A., & Piernik, A. (2022). *Salicornia europaea* L. Functional Traits Indicate Its Optimum Growth. *Plants*, 11(8), 1051.
<https://doi.org/10.3390/plants11081051>
- Calone, R., Sanoubar, R., Noli, E., & Barbanti, L. (2020). Assessing *Salicornia europaea* Tolerance to Salinity at Seed Germination Stage. *Agriculture*, 10(2), 29. <https://doi.org/10.3390/agriculture10020029>
- Cárdenas Pérez, S., Strzelecki, J., Piernik, A., Rajabi Dehnavi, A., Trzeciak, P., Puchałka, R., Mierek-Adamska, A., Chanona Pérez, J., Kačík, F., Račko, V., Kováč, J., Bhagia, S., & Ďurkovič, J. (2024). Salinity-driven changes in *Salicornia* cell wall nanomechanics and lignin composition. *Environmental and Experimental Botany*, 218, 105606.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105606>
- Chen, Z., Dong, Y., & Huang, X. (2022). Plant responses to UV-B radiation: signaling, acclimation and stress tolerance. *Stress Biology*, 2(1), 85–86.
<https://doi.org/10.1007/s44154-022-00076-9>
- Gunning, D. (2016). *Cultivating Salicornia europaea (Marsh Samphire)*. BIM (Bord Iascaigh Mhara).
- Hyskova, V., & Ryslava, H. (2018). *Hyperosmotic versus hypoosmotic stress in plants*. *Biochemistry & Analytical Biochemistry*, 7(1), 1000e170.
<https://doi.org/10.4172/2161-1009.1000e170>
- Legarda Goñi, R. & Gascón Artigas, M. J. (2011). Agua de mar: Derecho, supervivencia y soberanía alimentaria. <http://z.dolcarevolucio.cat/llibres1/Soberania%20alimentaria.pdf>
- Liu, W., Li, R., Han, T., Cai, W., Fu, Z., & Lu, Y. (2015). Salt stress reduces root meristem size by nitric Oxide-Mediated modulation of auxin accumulation and signaling in arabidopsis. *PLANT PHYSIOLOGY*, 168(1), 343–356.
<https://doi.org/10.1104/pp.15.00030>
- Ovando-Hidalgo, N., Tun-Garrido, J., Mendoza-González, G., & Parra-Tabla, V. (2020). Efecto del cambio climático en la distribución de especies clave en la vegetación de duna costera en la península de Yucatán, México. *Revista Mexicana De Biodiversidad*, 91.
<https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.2883>

- Orzoł, A., Głowacka, K., Pätsch, R., Piernik, A., Gallegos-Cerda, S. D., & Cárdenas-Pérez, S. (2025). The local environment influences salt tolerance differently in four *Salicornia europaea* L. inland populations. *Scientific Reports*, 15(1), 13128. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97394-5>
- Parra G. A.; Antigñir L.; Arce M. E.; Arias N. S.; Bianciotto O.; Yepes M. S.; Aras F.; Blessio A. Y.; Madeira C.; Robledo A.; y Galindo Cardenas, L. (2018). Crecimiento de tubos polínicos y eficiencia reproductiva en salicornia (*amerocornia*) neei piirainen y g. Kadereit, subg. Nov. Growth of pollinal tubes and reproductive efficiency in *Salicornia* (*Amerocornia*) neei Piirainen and G. Kadereit, subg. nov.
- Roblendano, R. T. (2022). Patrones de germinación de especies halófitas coexistentes a lo largo de un gradiente de salinidad en el Semiárido Mediterráneo. En *Universitas Miguel Hernandez, Facultad de Ciencias Experimentales*.
- Turcios, A. E., Braem, L., Jonard, C., Lemans, T., Cybulska, I., & Papenbrock, J. (2023). Compositional Changes in Hydroponically Cultivated *Salicornia europaea* at Different Growth Stages. *Plants*, 12(13), 2472. <https://doi.org/10.3390/plants12132472>
- Puccinelli, M., Marchioni, I., Botrini, L., Carmassi, G., Pardossi, A., & Pistelli, L. (2024). Growing *Salicornia europaea* L. with Saline Hydroponic or Aquaculture Wastewater. *Horticulturae*, 10(2), 196. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10020196>